

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до лабораторних занять з дисципліни

“ФІЗИКА ДІЕЛЕКТРИКІВ”

для студентів спеціальності
153 «Мікро- та наносистемна техніка»
денної і заочної форм навчання

Методичні вказівки до лабораторних занять з дисципліни “Фізика діелектриків” для студентів спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка» денної і заочної форм навчання / Укл.: Г.В. Сніжної, Н.А. Смирнова. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. – 41 с.

Укладачі: Сніжної Г. В., проф., д-р техн. наук
Смирнова Н. А., ст. викладач

Рецензент: Томашевський О. В., доц., канд. тех. наук

Відповід. за випуск: Коротун А. В., доц., канд. фіз.-матем. наук

Затверджено
на засіданні кафедри
"Мікро - і наноелектроніка"

Протокол №7
від “22” 01 2020 р.

Рекомендовано до видання
НМК ФРЕТ
Протокол № 6
від “23” 01 2020 р.

ЗМІСТ

Підготовка до проведення лабораторної роботи й оформлення звіту.....	4
1 Лабораторна робота № 1 Визначення діелектричної проникності лінійного діелектрика.....	5
1.1 Теоретичні відомості.....	5
1.1.1 Поляризація діелектриків і діелектрична проникність.....	5
1.1.2 Механізми поляризації.....	6
1.2 Класифікація діелектриків по впливу електричного поля та згідно з механізмами поляризації.....	10
1.2 Класифікація діелектриків згідно з механізмами поляризації...	
1.3 Методика експерименту.....	12
1.4 Завдання і хід виконання роботи.....	14
1.5 Контрольні запитання.....	15
2 Лабораторна робота №2 Сегнетоелектричний гістерезис.....	16
2.1. Теоретичні відомості.....	16
2.1.1 Поляризація діелектриків.....	16
2.1.2 Неполярні та полярні діелектрики, іонні кристали.....	17
2.1.3 Сегнетоелектрики.....	18
2.2 Методика дослідження сегнетоелектричного гістерезису.....	22
2.3 Завдання і хід виконання роботи.....	25
2.4 Контрольні запитання.....	25
3 Лабораторна робота № 3 Вивчення температурної залежності діелектричної проникності і тангенса кута діелектричних втрат в сегнетоелектрика.....	26
3.1 Теоретичні відомості.....	26
3.2 Завдання.....	31
3.3 Хід виконання роботи.....	31
3.4 Контрольні запитання.....	32
4 Лабораторна робота № 4 Визначення п'єзомодуля поляризованої кераміки.....	33
4.1 Теоретичні відомості.....	33
4.2 Завдання і хід виконання роботи.....	39
4.3 Контрольні запитання.....	40
Перелік рекомендованої літератури.....	41

ПІДГОТОВКА ДО ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ Й ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТУ

Лабораторна робота включає самостійне опрацювання теоретичного матеріалу, вивчення методик проведення і планування експерименту, вивчення вимірювальних засобів і приладів, обробку та інтерпретацію експериментальних даних. При проведенні лабораторного практикуму необхідно:

- підготуватися до опитування з теоретичного матеріалу, необхідного для виконання роботи (для отримання допуску до лабораторної роботи);
- уважно ознайомитися із порядком роботи на обладнанні;
- підготувати й оформити план виконання лабораторної роботи.

Після виконання лабораторної роботи провести необхідні розрахунки та опрацювання отриманих даних; оформити звіт, який повинен містити:

- титульну сторінку;
- мету роботи;
- опис досліджуваного явища, розрахункові формули, схему вимірювання, таблицю експериментальних даних, необхідні графічні залежності;
 - основні результати експерименту;
 - стислі висновки по роботі, в яких:
 - 1) вказати, що досліджувалось;
 - 2) вказати методику (чи метод) дослідження;
 - 3) вказати характер теоретичної залежності;
 - 4) визначити характер експериментальної залежності;
 - 5) навести конкретні встановлені факти, включаючи експериментальні й розрахункові дані;
 - 6) відзначити подібності і відмінності експериментальної і теоретичної залежностей, а також дати коротке пояснення характеру експериментальної залежності;
 - 7) вказати, як практично можна використати досліджений ефект чи явище (придумати приклади);
 - здати звіт з виконаної лабораторної роботи і відповіді на запитання викладача (отримати залік за виконану роботу).

1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

ВИЗНАЧЕННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОНИКНОСТІ ЛІНІЙНОГО ДІЕЛЕКТРИКА

Мета роботи:

- вивчити механізми поляризації діелектриків та методи вимірювання ємності;
- визначити діелектричну проникність лінійного діелектрика.

1.1 Теоретичні відомості

1.1.1 Поляризація діелектриків і діелектрична проникність

В діелектриках практично відсутні вільні носії заряду. Є тільки зв'язані заряди, які входять у склад атомів, молекул чи більш крупних об'єднань і можуть зміщуватись під дією електричного поля лише на дуже обмежену відстань; при цьому позитивні заряди зміщуються за полем, а негативні – проти поля.

Процес зміщення різнойменних зарядів в діелектриках під дією поля з утворенням протилежних полюсів називається *поляризацією*.

Оскільки при цьому центри позитивних і негативних зарядів не співпадають, в діелектрику утворюється внутрішнє електричне поле, направлене назустріч зовнішньому полю, яке спричинило поляризацію.

Результуюче поле в діелектрику визначається формулою:

$$E_{\delta\delta\zeta} = \frac{E_{\zeta\delta\delta}}{\epsilon}, \quad (1.1)$$

де ϵ – відносна діелектрична проникність діелектрика; в різних діелектриках ϵ може приймати значення від 1 аж до 10^5 .

Наприклад, $\epsilon=10$. Тоді, згідно з формулою (1.1),

$$E_{\delta\delta\zeta} = \frac{1}{10} E_{\zeta\delta\delta}.$$

Отже, $E_{\delta\delta\delta} = E_{\zeta\delta\delta} - E_{\delta\delta\zeta} = \left(1 - \frac{1}{10}\right) E_{\zeta\delta\delta} = 0,9 \cdot E_{\zeta\delta\delta}$, тобто внут-

рішнє поле в діелектрику компенсує 90 % зовнішнього поля.

Отже, ε характеризує ступінь протидії діелектрика зовнішньому полю, а також величину ємності $\tilde{N}$ конденсатора з діелектриком і величину питомої електропровідності діелектрика для змінного струму певної частоти.

Діелектрики практично не проводять постійний струм, зате добре проводять змінний струм, що забезпечує їм широке використання в електро- і радіотехніці.

Проходження змінного струму через діелектрик конденсатора можна проілюструвати наступною відомою формулою:

$$I = \frac{U}{X_c} = \frac{U}{1/\omega C} = \frac{U\omega\varepsilon\varepsilon_0 S}{d} - \text{струм пропорційний } \varepsilon. \quad (1.2)$$

1.1.2 Механізми поляризації

1.1.2.1 *Електронна поляризація* зумовлена пружним зміщенням і витягуванням електронних оболонок атомів і іонів під дією електричного поля.

На рис. 1.1, а зображена модель атома водню за відсутності електричного поля та під дією поля.

Час встановлення електронної поляризації дуже малий – близько 10^{-15} нс. Тому електронну поляризацію умовно називають *миттєвою*. Вона проявляється на всіх частотах аж до $10^{14} \div 10^{15}$ ГГц.

Електронна поляризація спостерігається в усіх різновидах діелектриків і не пов'язана з витратами енергії (аж до резонансних частот). Величина діелектричної проникності речовини з чисто електронною поляризацією чисельно дорівнює квадрату показника заломлення світла n :

$$\varepsilon = n^2. \quad (1.3)$$

Поляризованість атомів при електронній поляризації не залежить від температури, а діелектрична проникність речовини ε при підвищенні температури зменшується у зв'язку з тепловим розширенням діелектрика і зменшенням числа атомів у одиниці об'єму. Крива залежності ε від температури подібна до кривої зміни густини речовини, причому найбільш різке зниження ε спостерігається при агрегатних переходах речовини з твердого стану в рідкий і з рідкого – в газоподібний, як показано на рис. 1.2 (крива 1).

Зміна ϵ при зміні температури характеризується температурним коефіцієнтом діелектричної проникності:

$$\alpha_{\epsilon} = \frac{1}{\epsilon} \frac{d\epsilon}{dT} \quad [\text{K}^{-1}] \quad (1.4)$$

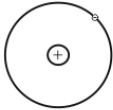
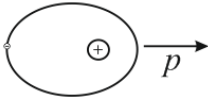
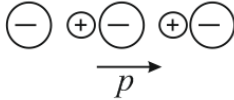
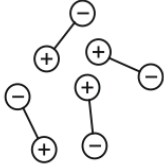
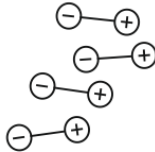
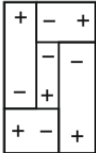
	$\vec{E} = 0$	$\vec{E} \neq 0 \longrightarrow$
a – електронна (класична модель атома водню)		
b – іонна		
v – дипольно- релаксaційна (орієнтаційна)		
z – спонтанна (самочинна)		

Рисунок 1.1 – Основні види поляризації діелектриків

1.1.2.2 *Іонна поляризація* (рис. 1.1, *б*) характерна для твердих тіл з іонною будовою і зумовлена невеликим пружним зміщенням зв'язаних іонів на відстані, які менші від сталої ґратки.

Величина поляризації з підвищенням температури зростає в результаті ослаблення пружних сил, що діють між іонами, оскільки відстані між ними при тепловому розширенні збільшуються.

Час встановлення іонної поляризації – близько 10^{-13} с.

1.1.2.3 *Дипольно-релаксацийна поляризація* відрізняється від електронної та іонної тим, що дипольні молекули, знаходячись у хаотичному тепловому русі, частково орієнтуються під дією поля, що і є причиною поляризації.

На рис. 1.1, в показано приблизне розміщення дипольних молекул за відсутності електричного поля та при його дії.

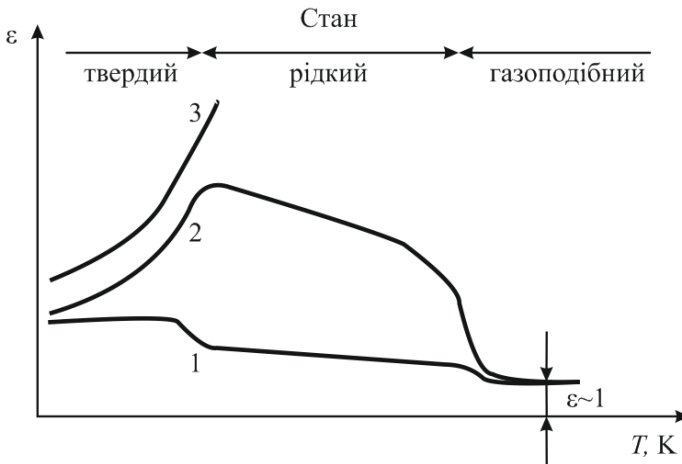
Після виключення електричного поля орієнтація частинок поступово послаблюється. Математично такий процес виражають за допомогою формули, що відображає залежність числа зорієнтованих полем частинок N_t , від часу:

$$N_t = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (1.5)$$

де N_0 – початкове число зорієнтованих частинок;

t – час, що пройшов після виключення поля;

τ – стала часу (час релаксації).



1 – електронна; 2 – дипольно-релаксацийна; 3 – іонно-релаксацийна поляризації

Рисунок 1.2 – Криві температурної залежності діелектричної проникності

Час релаксації – це проміжок часу, впродовж якого впорядкованість зорієнтованих полем диполів зменшується після виключення поля (внаслідок наявності теплового руху) в 2,7 (е) раз відносно поча-

ткового значення; при цьому система із нерівноважного стану наближається до рівноважного.

Дипольно-релаксаційна поляризація властива полярним газам і рідинам. Цей вид поляризації може спостерігатись і в твердих полярних органічних речовинах, але в цьому випадку поляризація, зазвичай, зумовлена вже не поворотом самої молекули, а поворотом наявних у ній полярних радикалів. Таку поляризацію називають *дипольно-радикальною*. Прикладом речовини з цим видом поляризації є целюлоза, полярність якої пояснюється наявністю гідроксильних груп – *ОН* і кисню.

Температурна залежність їхньої діелектричної проникності зображена на рис. 1.2 (крива 2).

1.1.2.4 *Іонно-релаксаційна поляризація* спостерігається в іонних діелектриках з нещільним пакуванням іонів, наприклад, в неорганічних стеклах і в деяких кристалічних речовинах.

У цьому випадку слабо зв'язані іони речовини під дією зовнішнього електричного поля серед хаотичних теплових перекидань мають надлишкові перекидання в напрямку поля і зміщуються на відстані, що перевищують сталу ґратки. Після виключення електричного поля іони поступово повертаються до центрів рівноваги, тобто цей механізм можна віднести до релаксаційної поляризації, при якій має місце незворотне розсіювання енергії у вигляді тепла. Температурна залежність такої діелектричної проникності наведена на рис. 1.2 (крива 3).

1.1.2.5 *Електронно-релаксаційна поляризація* виникає за рахунок збуджених тепловою енергією надлишкових “дефектних” електронів або дірок.

Слід відзначити відносно високе значення діелектричної проникності, яке може мати місце при електронно-релаксаційній поляризації, а також наявність максимуму в температурній залежності ϵ .

1.1.2.6 *Резонансна поляризація* спостерігається в діелектриках при світлових частотах. Вона залежить від фізико-хімічних особливостей речовини і може бути зв'язана з власною частотою електронів чи іонів або з характеристичною частотою дефектних електронів (при більш низьких частотах).

Резонансна поляризація зв'язана з аномальною дисперсією світла і ще недостатньо вивчена.

1.1.2.7 *Міграційна поляризація* є додатковим механізмом поляризації, що проявляється у твердих тілах неоднорідної структури при макроскопічних неоднорідностях і наявності домішок.

Ця поляризація спостерігається при відносно низьких частотах і пов'язана зі значним розсіюванням електричної енергії. Причинами виникнення такої поляризації є провідні та напівпровідні включення в технічних діелектриках, наявність шарів із різною провідністю і т.і.

При внесенні неоднорідних матеріалів в електричне поле вільні електрони та іони провідних та напівпровідних включень переміщуються в межах кожного включення, яке стає подібним до великої поляризованої молекули. У граничних шарах шаруватих матеріалів і в приелектродних шарах може мати місце накопичення зарядів повільних іонів, яке створює ефект міграційної поляризації. До міграційної можна віднести також іонно-релаксаційну поляризацію, при якій переміщення іонів здійснюється на відстані, що перевищують період гратки.

1.1.2.8 *Спонтанна (самочинна) поляризація* (рис. 1.1, з) існує тільки у груп твердих діелектриків, що мають такі ж особливості поляризації, як і сегнетова сіль, і тому отримали назву – *сегнетоелектрики*. Більш детально про особливості їх поляризації дивіться в наступній лабораторній роботі.

1.2 Класифікація діелектриків по впливу електричного поля та згідно з механізмами поляризації

В залежності від характеру впливу напруженості електричного поля на значення відносної діелектричної проникності матеріалу всі діелектрики ділять на *лінійні* та *нелінійні*.

Для лінійних діелектриків із безінерційними механізмами поляризації (електронної, іонної) і при відсутності електропровідності залежність заряду конденсатора від напруги (із зміною полярності) показана на рис. 1.3, а, для матеріалів з уповільненими та релаксаційними механізмами поляризації – на рис. 1.3, б. Площа еліпса пропорційна кількості енергії, що розсіюється діелектриком за один період зміни напруги внаслідок наявності у нього релаксаційних механізмів поляризації. Для нелінійних діелектриків – сегнетоелектриків – за цих

умов крива залежності заряду від напруги має вигляд петлі гістерезису (рис. 1.3, в).

На рис. 1.3 наведені також залежності ϵ від напруженості електричного поля, що підкреслюють відмінності лінійних і нелінійних діелектриків. Як видно з рисунка, ϵ нелінійного діелектрика можна змінювати за допомогою електричного поля. Тому нелінійні діелектрики можна назвати *активними (керованими)* діелектриками.

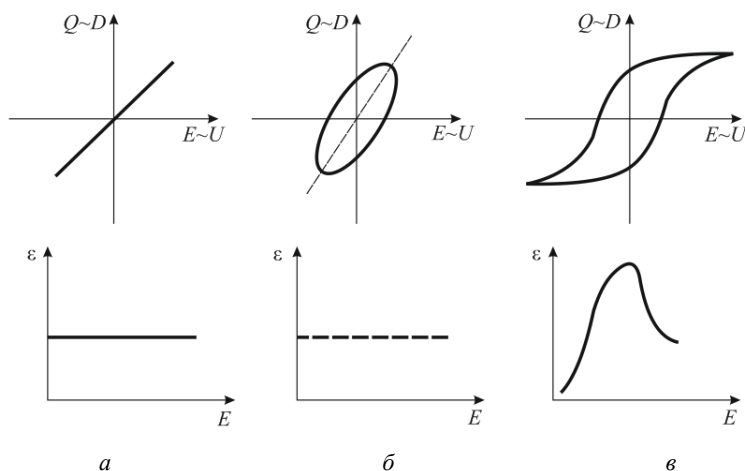


Рисунок 1.3 – Залежність заряду та діелектричної проникності від напруженості електричного поля для лінійних діелектриків (а), для матеріалів з релаксційними механізмами (б) і для нелінійних діелектриків (в)

Лінійні діелектрики можна розділити на декілька груп у залежності від механізму поляризації:

- *неполярними діелектриками* називаються гази, рідини і тверді речовини в кристалічному й аморфному станах, яким властива, в основному, лише електронна поляризація. До них відносяться водень, бензол, парафін, сірка, поліетилен та ін.;
- *полярні (дипольні) діелектрики* – це органічні рідкі, напіврідкі та тверді речовини, що мають одночасно дипольно-релаксційну та електронну поляризації. До них відносяться каніфольні компаунди, феноло-формальдегідні та епоксидні смоли, целюлоза, сполуки вуглецю з воднем і т. і.;

- *іонні сполуки* – це тверді неорганічні діелектрики з іонною, електронною, іонно- та електронно-релаксаційними поляризаціями. В цій групі через суттєву різницю їх електричних характеристик доцільно виділити дві підгрупи матеріалів:
 - ✓ діелектрики з іонною та електронною поляризаціями (кристалічні речовини із щільним пакуванням іонів (кварц, слюда, сапфір, рутил тощо));
 - ✓ діелектрики з іонною, електронною і релаксаційними поляризаціями (неорганічні стекла, фарфор і кристалічні діелектрики з нещільним пакуванням частинок у ґратці).

1.3 Методика експерименту

Для експериментального визначення діелектричної проникності діелектрика використовується вимірювач індуктивностей і ємностей височастотний типу *E7–5A*, який працює за резонансним методом.

Електрична функціональна схема приладу наведена на рис. 1.4.

В коливальний контур генератора I включено зразковий конденсатор змінної ємності $C_{зраз}$, а в контур генератора II включається ємність із досліджуваним діелектриком C_x .

Перед вимірюванням за відсутності в другому контурі досліджуваної ємності C_x і при замкнутих накоротко затискувачах L_x ручкою “Початкова настройка” виконують настройку обох генераторів на одну й ту ж частоту. Контроль настройки здійснюють за нульовими биттями (індикатор биттів звуковий і візуальний).

Потім включають у контур генератора II ємність C_x (при замкнутих затискувачах L_x) і, змінюючи ємність зразкового конденсатора $C_{зраз}$, відновлюють рівність частот і визначають $C_{зраз}$. Вимірювана ємність C_x дорівнює ємності $C_{зраз}$.

Таким способом можна вимірювати ємності в межах $0 \div 5\,000$ пФ.

Якщо конденсатор має ємність C_x більшу, ніж $5\,000$ пФ, тоді C_x можна включити послідовно з іншою (відомою) ємністю C'_x , що не перевищує $5\,000$ пФ.

Вимірявши результуючу ємність $C_{рез}$ послідовно з'єднаних ємностей C_x і C'_x , значення досліджуваної ємності C_x може бути визначене з формули

$$\frac{1}{C_{рез}} = \frac{1}{C_x} + \frac{1}{C'_x}. \quad (1.6)$$

Зрозуміло, що точність вимірювання великих ємностей з використанням цього методу буде знижуватися по мірі збільшення C_x чи зменшення C'_x (тобто при збільшенні різниці між C_x і C'_x).

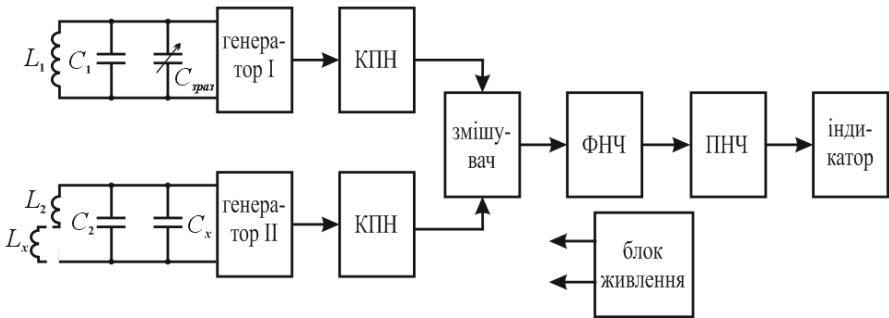


Рисунок 1.4 – Електрична функціональна схема для вимірювання індуктивностей та ємностей *E7–5A*

Для вимірювання ємностей (і великих, і малих) може бути використаний також наведений нижче варіант резонансного методу з використанням високочастотного генератора та осцилографа. Блок-схема установки наведена на рис. 1.5.

При збіганні частоти генератора f_G з частотою f_0 власних коливань у коливальному контурі спостерігається електричний резонанс.

Цей ефект проявляється на екрані осцилографа за різким збільшенням амплітуди сигналу.

Знаючи, що

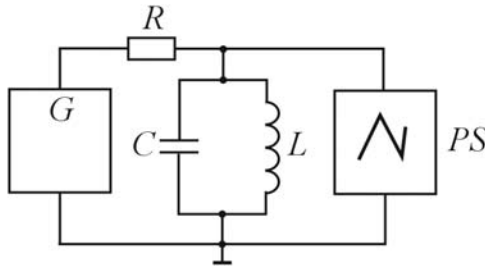
$$f_G = f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LN}}, \quad (1.7)$$

де f_G визначається за допомогою частотоміра або по шкалі генератора, а індуктивність L вказується викладачем; із виразу (1.5)

можна визначити ємність конденсатора C_x ; після цього з відомої формули для ємності плоского конденсатора

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}, \quad (1.8)$$

визначають невідому величину відносної діелектричної проникності досліджуваного діелектрика.



G – високочастотний генератор; R – резистор; C – вимірювальний конденсатор; L – котушка індуктивностей; PS – осцилограф

Рисунок 1.5 – Блок-схема установки для вимірювання ємності

З меншою точністю, зате в дуже широкому діапазоні ($0 \dots 20$ мкФ) ємність може бути виміряна за допомогою мультиметра, наприклад, типу М 890. Також може бути використаний мостовий метод.

1.4 Завдання і хід виконання роботи

1.4.1 За допомогою одного з вищевказаних методів визначити ємність конденсаторів з досліджуваними діелектриками.

1.4.2 За допомогою лінійки й мікрометра визначити геометричні розміри конденсаторів.

1.4.3 За допомогою формули (1.8) визначити діелектричну проникність діелектриків.

1.4.4 Оцінити величину похибки експерименту.

1.5 Контрольні запитання

1. Чому діелектрики не пропускають постійний електричний струм?
2. Чи проводять діелектрики змінний струм? Чому?
3. Що показує відносна діелектрична проникність діелектрика?
4. Дати визначення поляризації діелектриків.
5. Назвати відомі механізми поляризації діелектриків.
6. Детально розглянути механізми поляризації.
7. Дати класифікацію лінійних діелектриків.
8. Що називають часом релаксації?
9. Як залежить заряд конденсатора з діелектриком від напруги і типу діелектрика?
10. Що було б, якби в природі не існувало діелектриків?

2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

СЕГНЕТОЕЛЕКТРИЧНИЙ ГІСТЕРЕЗИС

Мета роботи: вивчення явища поляризації сегнетоелектриків осцилографічним методом.

2.1 Теоретичні відомості

2.1.1 Поляризація діелектриків

При дії зовнішнього електричного поля на діелектрики вони поляризуються. Для характеристики поляризованого стану використовується *вектор поляризації* (або *поляризованості*) P . Ця величина дорівнює сумі дипольних моментів одиниці об'єму діелектрика:

$$\vec{P} = \frac{1}{V} \sum \vec{p}_i, \quad (2.1)$$

де $\vec{p}_i = q \cdot \vec{r}$ – елементарний дипольний момент структурної одиниці діелектрика (молекули, атома, елементарної кристалічної комірки);

q – елементарний заряд;

r – відстань між двома протилежними зарядами;

V – об'єм діелектрика.

Вектор поляризації $\vec{P}$ зв'язаний з поверхневою густиною поляризаційного заряду σ співвідношенням

$$P = \sigma.$$

Величина P пропорційна напруженості електричного поля:

$$\vec{P} = \epsilon_0 \alpha \vec{E}, \quad (2.2)$$

де α – діелектрична сприйнятливість речовини;

ϵ_0 – електрична стала.

Для характеристики поведінки діелектрика в зовнішньому електричному полі використовується вектор електричної індукції $\vec{D}$:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}, \quad (2.3)$$

де ε – відносна діелектрична проникність речовини.

Враховуючи залежність 2.2, будемо мати

$$\varepsilon \vec{E} = \varepsilon_0 \vec{E} + \alpha \varepsilon_0 \vec{E}, \quad (2.4)$$

$$\text{звідки} \quad \varepsilon = 1 + \alpha. \quad (2.5)$$

В залежності від будови речовини, типу хімічних зв'язків і механізму поляризації розрізняють неполярні й полярні діелектрики, іонні кристали та сегнетоелектрики.

2.1.2 Неполярні та полярні діелектрики, іонні кристали

Діелектрик називається *неполярним*, якщо за відсутності зовнішнього електричного поля дипольний момент кожного атома (або молекули) дорівнює нулю ($\vec{p}_i = 0$) і, як наслідок, поляризованість дорівнює нулю ($\vec{P} = 0$).

Молекули полярного діелектрика мають дипольний момент ($\vec{p}_i \neq 0$) навіть за відсутності зовнішнього поля, але внаслідок хаотичного теплового руху вектори $\vec{p}_i$ зорієнтовані в просторі таким чином, що $\vec{P} = 0$.

В зовнішньому електричному полі електрони атомів чи іонів будь-якого діелектрика зміщуються відносно заряджених ядер, виникають індуковані диполі з $\vec{p}_i \neq 0$ і результуюча поляризованість $\vec{P} \neq 0$. Така поляризація називається *поляризацією електронного зміщення* і має місце в усіх діелектриках в будь-якому агрегатному стані.

Існують діелектричні іонні кристали (типу NaCl), у вузлах кристалічної ґратки яких знаходяться позитивні та негативні іони, і вони можуть мати електричний момент за відсутності зовнішнього поля. Проте цей момент, як правило, не проявляється, оскільки на поверхні кристала осідають іони з повітря (які завжди існують в невеликій кількості) і компенсують поляризаційний заряд кристала. При дії зовнішнього поля іони Na і Cl зміщуються в протилежних напрямках і з'являється нескомпенсований електричний момент кристала. Цей тип поляризації називається *поляризацією іонного зміщення*.

Якщо в електричне поле внести полярний діелектрик, то його диполі будуть орієнтуватися уздовж поля і з'явиться відмінна від нуля

поляризованість $\vec{P}$. До полярних діелектриків відносяться багато рідин і гази (H_2O , HCl , CO , спирти, ефіри), схожий механізм поляризації мають деякі тверді речовини з водневим зв'язком, наприклад, лід.

Поляризація полярних діелектриків називається дипольно-орієнтаційною, вона суттєво залежить від температури.

2.1.3 Сегнетоелектрики

Сегнетоелектричні властивості були вперше виявлені у кристалів сегнетової солі (1921), а потім у дигідрофосфату калію KH_2PO_4 (1935). Інтенсивні дослідження сегнетоелектриків почалися в 1945 році, коли були виявлені сегнетоелектричні властивості кераміки BaTiO_3 – родоначальника великого сімейства сегнетоелектриків киснево-октаедричного типу.

Сегнетова сіль – подвійна натрієво-калієва сіль винної кислоти $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, названа на честь французького аптекаря Е. Сеньєта (E. Seignette) і має вигляд безбарвних кристалів, що розчиняються у воді. Густина – $1,766 \text{ г/см}^3$, $T_{\text{пл}} = 55,6^\circ\text{C}$, мол. м. – 282,12.

Сегнетоелектрики – це кристали, що мають в певному інтервалі температур спонтанну (довільну) поляризацію, напрям якої можна змінити зовнішнім електричним полем. Зазвичай сегнетоелектрики не є однорідно поляризованими у всьому об'ємі, а складаються із областей однорідної поляризації – *доменів* (рис. 2.1) (від франц. *domaine* – володіння; область, сфера).

У межах одного домена елементарні дипольні моменти $\vec{p}_i$ зорієнтовані в одному напрямку і створюють електричний момент домена $\vec{P}_d$. В різних доменах орієнтації векторів різні, внаслідок чого при відсутності зовнішнього електричного поля результуючий дипольний момент усього кристала, як правило, дорівнює нулю. Прикладене зовнішнє поле орієнтує вектори різних доменів в одному напрямку. Сегнетоелектрик поляризується і набуває результуючого вектор $\vec{P}$.

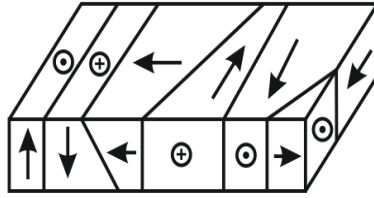


Рисунок 2.1 – Схематичне зображення доменів тетрагональної модифікації BaTiO_3 ; стрілки і знаки $\oplus$ і $\ominus$ вказують на напрям вектора P



Рисунок 2.2 – Залежність діелектричної проникності сегнетоелектрика від напруженості електричного поля

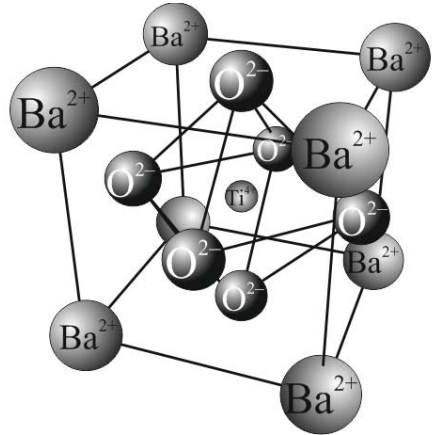


Рисунок 2.3 – Елементарна комірка титанату барія

Поляризація сегнетоелектриків, на відміну від звичайних діелектриків, нелінійно залежить від напруженості зовнішнього електричного поля E . Внаслідок цього діелектрична проникність не є сталою величиною, а нелінійно змінюється при зміні напруженості поля. Залежності $P(E)$ і $\varepsilon(E)$ мають складний характер (рис. 2.2), причому діелектрична проникність сегнетоелектрика може досягати аномально великих значень $\sim 10^3 \div 10^5$ і більше.

Переполаризація сегнетоелектрика в сильних змінних електричних полях призводить до діелектричного гістерезису, що виявляється у вигляді характерної залежності $P = f(E)$, що називається *петлею діелектричного гістерезису* (рис. 2.4).

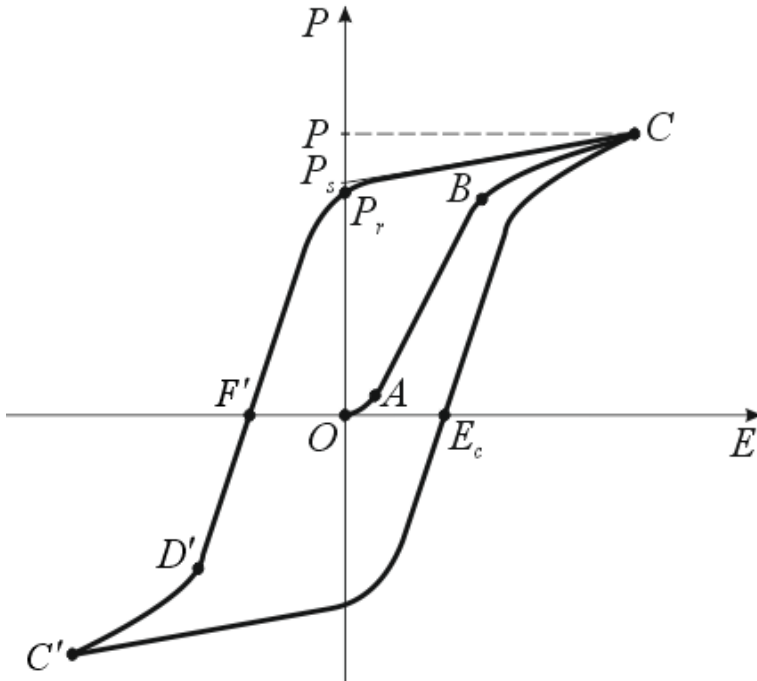


Рисунок 2.4 – Залежність поляризації сегнетоелектрика від напруженості електричного поля

Припустимо, що до сегнетоелектрика прикладене зовнішнє поле. Коли напруженість поля E мала (ділянка OA кривої $OABC$), домени не можуть переорієнтуватися, і поляризація лінійно залежить від поля. На ділянці AB відбувається активна орієнтація доменів, і поляризація P різко зростає. Коли всі домени зорієнтовані за полем і кристал стає *однодоменним*, знову спостерігається слабе лінійне зростання поляризації (ділянка BC).

При зменшенні напруженості поля до нуля поляризація в нуль не обертається. Така поляризація називається *залишковою* (P_r) і свідчить про збереження монодоменоного стану кристала.

Після зміни напрямку поля E подальше його зростання призводить до того, що при деякому значенні $E = -E_c$ (що називається *коерцитивним полем*, точка F') поляризація кристала перетворюється на нуль.

Далі поляризація змінює знак і збільшується (ділянка $F'C'$).

Зміна поля від точки C' повторює процес поляризації за кривою $C'E_cC$, і гістерезисний цикл закінчується.

В наступному періоді зміни зовнішнього поля гістерезисна крива повторюється.

Крива $OABC$ – *основна крива поляризації*, на ній лежать вершини петель, одержаних при різних полях.

Повну поляризацію сегнетоелектрика слід розглядати як суму *індукованої полем* P_i та *спонтанної* P_s поляризації. Якщо провести дотичну до кривої CP_r до перетину з віссю ординат, тоді в точці перетину значення ординати буде дорівнювати спонтанній поляризації зразка P_s .

Точка перетину перпендикуляра, який опускається з точки C на вісь ординат, дає значення повної поляризації $P = P_i + P_s \cdot F'$

Спонтанна поляризація виникає при температурах фазових переходів, коли відбувається зміна структури кристалічної ґратки.

Розглянемо, наприклад, як виникає спонтанна поляризація в кристалах $BaTiO_3$ (титанат барію). $BaTiO_3$ має структуру *перовскіту* (рис. 2.3), яку можна представити як систему октаедрів, з'єднаних вершинами. У вузлах октаедрів знаходяться іони кисню O^{2-} , в центрах – іони Ti^{4+} , а в пустотах між ними – крупні іони Ba^{2+} . При високих температурах ($T > 120^\circ C$) елементарна комірка кубічна і не має дипольного моменту.

Якщо знижувати температуру, то при $T = 120^\circ C$ кубічна ґратка перетворюється на тетрагональну (витягнуту вздовж осі октаедрів).

При цьому іон титану зміщується до одного з іонів кисню. Виникає дипольний момент, комірка стає полярною. В ряду сусідніх комірок зміщення іона Ti здійснюється в одному й тому ж напрямку. Із комірок з однаковим напрямком дипольного моменту утворюється домен з моментом $\vec{P}_d$. Проте всі елементарні комірки кристала не можуть бути поляризовані в одному напрямку, оскільки, по-перше, зміщення іона Ti^{4+} до іона O^{2-} рівноймовірне в шести можливих напрямках і носить випадковий характер; по-друге, кристалу енергетично “невигідно” бути наполяризованим в цілому, оскільки це зумовлювало

б розсіювання енергії електричного поля в зовнішньому просторі. Розбивка на домени зменшує енергію створюваного кристалом поля, оскільки сумарний дипольний момент кристала в цьому випадку дорівнює нулю ($\vec{P} = 0$).

2.2 Методика дослідження сегнетоелектричного гістерезису

В даній роботі потрібно експериментально одержати сімейство петель гістерезису й обчислити основні параметри сегнетоелектрика: P , P_r , P_s , E_c , ε_{max} і побудувати графіки залежності $P = f(E)$ та $\varepsilon = f(E)$.

Принципова електрична схема для вимірювання зображена на рис.2.6.

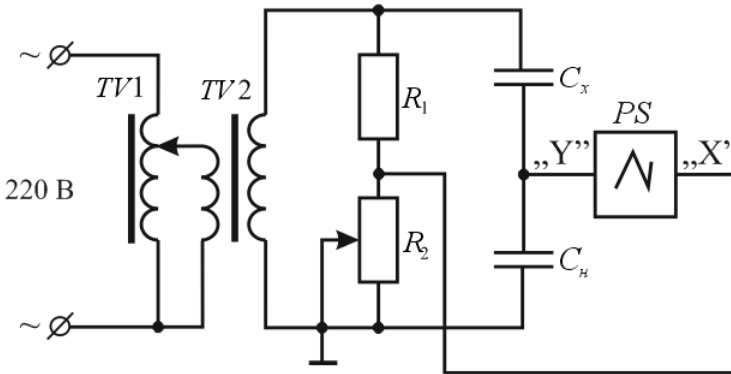


Рисунок 2.6 – Принципова електрична схема для дослідження гістерезису в сегнетоелектриках

З виходу автотрансформатора TV1 змінна напруга ($f = 50$ Гц) поступає на первинну обмотку підвищуючого трансформатора TV2, а з виходу останнього змінна напруга поступає на два подільника: резистивний і ємнісний.

Резистивний подільник виконаний на резисторах R_1 і R_2 , з виходу подільника напруга подається на вхід „X” осцилографа: ця напруга пропорційна напруженості поля в зразку, а її амплітуда визначає ширину зображуваної петлі гістерезису.

Ємнісний подільник утворений досліджуваным конденсатором C_x та навантажувальним C_n , причому, $C_x \gg C_n$, а оскільки вони включені послідовно, то накопичують однакові заряди:

$$Q_x = Q_n,$$

отже, $C_x \cdot U_x = C_n \cdot U_n$ і $U_n = \frac{C_x \cdot U_x}{C_n}$, тобто низька напруга U_n на навантажувальному конденсаторі пропорційна високій напрузі U_x на досліджуваному конденсаторі C_x .

Оскільки поляризація $P = \sigma$, а $\sigma = \frac{Q_x}{S}$, тоді

$$P = \frac{Q_x}{S} = \frac{Q_n}{S} = \frac{C_n \cdot U_n}{C_x} \quad (2.6)$$

де S – площа металевих обкладинок досліджуваного зразка C_x .

Для одержання вірних числових значень P і E осцилограф повинен бути відкалібрований (тобто повинна бути визначена чутливість осцилографа по входах „X” та „Y”). Для калібрування по „Y” на вхід „Y” подають зовнішній сигнал відомої величини або сигнал від внутрішнього калібратора і визначають амплітуду $\{$ відхилення сигналу (в сантиметрах чи поділках); при цьому сигнал не повинен виходити за межі робочої області екрана. Чутливість входу „Y” за напругою визначають за формулою

$$S_y = \frac{U_A}{l_y} \left[\frac{B}{cm} \right] \quad (2.7)$$

де U_A – амплітудне значення калібрувального сигналу.

Потрібно пам’ятати, що коли на вхід осцилографа подано змінний синусоїдальний сигнал, то на екрані ми побачимо подвійну амплітуду, що має назву ”розмах”; амплітудне і діюче (або ефективне) значення напруги зв’язані співвідношенням:

$$U_A = \sqrt{2} \cdot U_{\tilde{A}}. \quad (2.8)$$

Калібрування осцилографа за входом „X” виконується аналогічно, тільки на вхід „X” треба подавати більший сигнал, оскільки чутливість по „X” нижча, ніж по „Y”.

Напруженість електричного поля E , в якому знаходиться конденсатор C_x , визначається за формулою:

$$E = \frac{U_{C_x}}{d}, \quad (2.9)$$

де d – відстань між обкладинками конденсатора.

Напруга U_{C_x} на конденсаторі може бути визначена з наступних міркувань: вважаємо, що напруги U_{C_1} і U_{R_2} нам відомі – визначаємо за допомогою осцилографа. Напруги на ємнісному $(C_x - C_H)$ і резистивному $(R_1 - R_2)$ подільниках однакові. Вихідна напруга U_{R_2} резистивного подільника зв’язана з повною напругою подільника U за такою формулою:

$$U_{R_2} = I \cdot R_2 = \frac{U_{под.}}{R_1 + R_2} \cdot R_2 \quad (2.10)$$

де I – струм подільника.

Отже, враховуючи, що напруга на досліджуваному конденсаторі $U_{C_x} = U_{под.} - U_{C_H}$ і знаючи з вимірювань напруги U_{C_x} і U_{R_2} , легко обчислити напруженість електричного поля, в якому знаходиться діелектрик конденсатора C_x .

2.3 Завдання і хід виконання роботи

2.3.1 Зібрати схему, показану на рис. 2.6.

2.3.2 Включити осцилограф.

2.3.3 Подати напругу в схему. Збільшуючи подавану напругу, одержати на екрані осцилографа сімейство петель гістерезису й зарисувати осцилограми на кальку.

2.3.4 За координатами вершин проміжних петель обчислити поляризацію P і побудувати основну криву поляризації $P = f(E)$.

2.3.5 Скориставшись співвідношенням між P та E (формула (2.2) – $\vec{P} = \epsilon_0 \alpha \vec{E}$), з формули $\epsilon = 1 + \alpha = 1 + \frac{P}{\epsilon_0 E}$ обчислити значення

ϵ та побудувати для основної кривої поляризації графік залежності $\epsilon = f(E)$.

2.3.6 Графічно визначити ϵ_{max} і E_{max} .

2.3.7 По крайній (граничній) петлі гістерезису визначити повну поляризацію P , спонтанну P_s , індуковану $P_i = P - P_s$, залишкову P_r , а також величину коерцитивного поля E_c .

2.4 Контрольні запитання

1. Яка величина характеризує поляризований стан діелектрика?
2. Які бувають діелектрики в залежності від будови речовини, типу хімічних зв'язків і механізму поляризації?
3. Дайте характеристику сегнетоелектрикам.
4. Як утворюється петля гістерезису?
5. Яке поле називається коерцитивним?
6. Чому крива $OABC$ на рис. 2.4 називається основною?
7. Як і для чого проводиться калібрування осцилографа?

З ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

ВИВЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОНИКНОСТІ І ТАНГЕНСА КУТА ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ВТРАТ В СЕГНЕТОЕЛЕКТРИКАХ

Мета роботи:

- ознайомитися з особливостями поляризації та основними властивостями сегнетоелектриків;
- дослідити температурну залежність діелектричної проникності ϵ .

3.1 Теоретичні відомості

Сегнетоелектриками називаються діелектрики, що мають доменну структуру та характеризуються наступними особливостями поляризації:

а) дуже великим в порівнянні з іншими матеріалами ступенем поляризації і, як наслідок, великим значенням діелектричної проникності ϵ ;

б) нелінійною залежністю заряду від величини прикладеної напруги, що у звичайних діелектриках не спостерігається;

Поляризація сегнетоелектриків зв'язана з достатньо великими затратами енергії, тобто в змінному електричному полі спостерігається гістерезисна петля «переполіаризації». Нелінійна залежність заряду від прикладеної напруги свідчить про наявність залежності ϵ від напруженості електричного поля.

в) різкою залежністю поляризації від температури та проявом сегнетоелектричних властивостей тільки у визначених температурних інтервалах. У більшості сегнетоелектриків їх сегнетоелектричні властивості проявляються при будь-яких температурах, аж до деякої граничної, при якій відбувається зміна структури матеріалу й сегнетоелектричні властивості зникають. Цю температуру називають *точкою Кюрі*.

В 1944 році Б.М.Вулом була показана наявність сегнетоелектричних властивостей у кристалах титанату барію (BaTiO_3).

Розглянемо спрощено, як виникають домени на прикладі BaTiO_3 . При високих температурах ($>130^\circ\text{C}$) BaTiO_3 має кубічну

гратку (рис. 2.4). Іони Ba^{2+} знаходяться в вершинах куба, іони кисню O^{2-} в центрах граней куба, а іон титану Ti^{4+} – в центрі куба.

Іон Ti^{4+} має невеликі розміри. В елементарній комірці відстань між центрами іонів кисню й титану більша, ніж сума їх радіусів. Тому іон титану під дією теплового руху може переміщуватися між шістьма іонами кисню, які його симетрично оточують, внаслідок цього середнє положення Ti^{4+} співпадає з центром симетрії й електричний момент кожної елементарної комірки дорівнює нулю.

При охолодженні кристала BaTiO_3 до $T \cong 120^\circ \text{C}$ тепловий рух стає менш інтенсивним і це призводить до того, що іон титану зміщується до якогось із шести іонів кисню. Система $\text{O}^{2-} - \text{Ti}^{4+} - \text{O}^{2-}$ стає асиметричною та набуває електричного моменту.

В елементарних комірках, які знаходяться в будь-якому невеликому об'ємі, зміщення іонів титану відбувається в одну сторону, їх моменти додаються і в результаті цього виникає самодовільна наелектризована область – *домен* (рис. 1.1, з; 2.1).

Кристал розбивається на домени так, що їх електричні моменти компенсують один одного і в цілому кристал залишається електрично нейтральним. Температура, при якій утворюються домени, називається *точкою Кюрі*. Для BaTiO_3 ця температура $\sim 120^\circ \text{C}$. Якщо сегнетоелектрик з доменною структурою нагріти, тоді вище температури Кюрі домени зникають.

Сегнетоелектрики, які використовують в техніці, мають точку Кюрі значно вище кімнатної температури.

На рис. 3.1 зображена залежність діелектричної проникності титанату барію від температури при різних значеннях напруженості поля.

Із залежностей видно, що при $T \approx 120^\circ \text{C}$ маємо чітко виражену точку Кюрі, нижче якої матеріал набуває сегнетоелектричних властивостей, хоча в ньому спостерігаються і деякі додаткові структурні зміни (вторинні максимуми на кривих).

Температурна залежність діелектричної проникності поблизу точки Кюрі, але вище неї, може бути описана законом Кюрі-Вейса:

$$\varepsilon = \frac{C}{T - \Theta}, \quad (3.1)$$

де C – стала Кюрі-Вейса ($C = 10^3 \div 10^5$ К);

Θ – температура Кюрі.

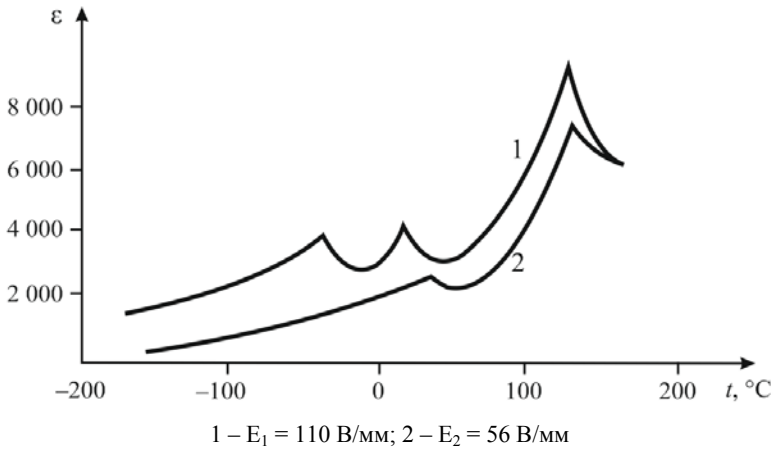


Рисунок 3.1 – Температурна залежність ε для BaTiO_3 при двох значеннях напруженості електричного поля

Якщо помістити сегнетоелектрик у зовнішнє електричне поле, то в ньому будуть відбуватися звичайні електронна та іонна поляризації доменів. Електричні моменти доменів будуть орієнтуватися переважно в напрямку поля. Чим більша буде напруженість поля, тим більше число електричних моментів доменів буде направлено за полем, що створює ефект досить сильної поляризації. Тому сегнетоелектрики мають надвисоке значення діелектричної проникності (до 10^5 – у деяких сегнетоелектриків).

При деякій напруженості поля всі електричні моменти доменів будуть зорієнтовані за полем. Подальше збільшення напруженості електричного поля вже не буде викликати збільшення інтенсивності поляризації – відбудеться насичення.

Насичення характерне тільки для сегнетоелектриків, звичайні види поляризації до насичення не призводять.

Поляризація доменів має нелінійний характер. Це означає, що заряд на обкладинках конденсатора з діелектриком зростає непропорційно напрузі (рис. 3.2).

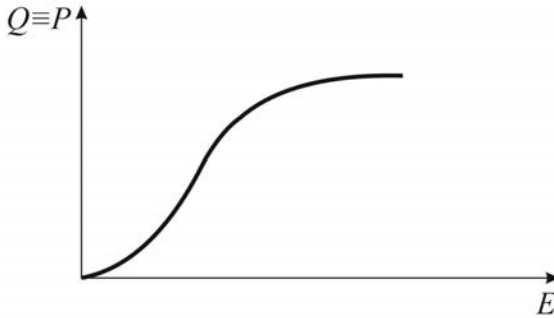


Рисунок 3.2 – Залежність заряду від напруженості електричного поля для неполяризованого сегнетоелектрика

У зв'язку з нелінійністю діелектрична проникність сегнетоелектриків не є постійною величиною, а залежить від напруженості поля (рис. 2.3).

Поляризація сегнетоелектриків супроводжується великими затратами енергії. Тому в змінному електричному полі спостерігається діелектричний гістерезис (рис. 2.5). Площа петлі гістерезису пропорційна енергії, що розсіюється за один період. Вище точки Кюрі діелектричний гістерезис зникає й сегнетоелектрик веде себе як звичайний діелектрик.

Діелектричні втрати в сегнетоелектриках пов'язані з явищем спонтанної поляризації. Тому втрати в сегнетоелектриках значні при температурах нижче температури Кюрі, коли має місце спонтанна поляризація. При температурах вище точки Кюрі втрати в сегнетоелектриках помітно зменшуються.

Розглянемо детальніше це питання. Конденсатор, що містить діелектрик із втратами, не можна розглядати як «чисту» ємність, тому в еквівалентній схемі його можна замінити ідеальним конденсатором з паралельно включеним активним опором (паралельна схема) (рис. 3.3, а) або конденсатором з послідовно включеним опором (послідовна схема) (рис. 3.3, б). Такі еквівалентні схеми, звичайно, не дають пояснення механізму діелектричних втрат і введені лише умовно.

В змінних полях ємнісний струм I_c , що характеризує зміщення зв'язаних зарядів при поляризації, зсунутий по фазі відносно напруги U на 90° . Діелектричними втратами є та кількість тепла, що виділяється на еквівалентному опорі:

$$Q = I_R^2 \cdot R \text{ або } Q = I_r \cdot r^2. \quad (3.2)$$

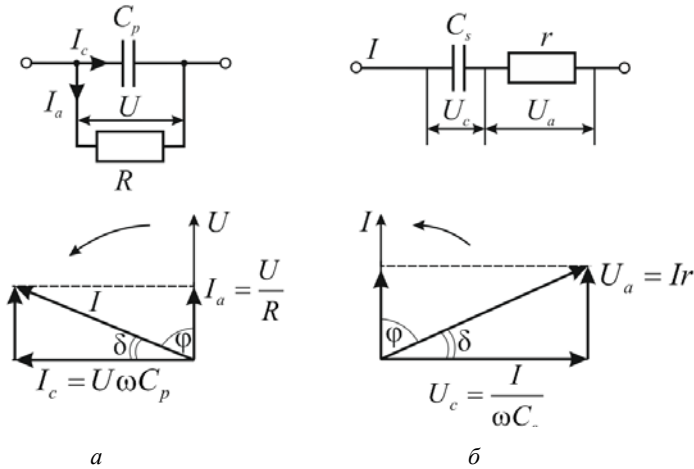


Рисунок 3.3 – Паралельна та послідовна схеми заміщення електричного конденсатора та векторні діаграми для них

В електротехніці втрати енергії визначають через кут зсуву фаз φ між струмом і напругою. Цей кут близький до 90° .

Діелектричні ж втрати прийнято характеризувати кутом δ , який доповнює кут φ до 90° .

Тангенс кута діелектричних втрат безпосередньо входить у формулу для розсіяваної в діелектрику потужності, тому практично найчастіше користується цією характеристикою.

$$\text{Тоді} \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{I_a}{I_r}, \quad (3.3)$$

де I_a , I_r – відповідно активний і реактивний струми.

Як видно з векторних діаграм (рис. 3.3),

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega RC} \quad - \text{ для паралельної схеми заміщення і} \quad (3.4)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \omega rC \quad - \text{ для послідовної схеми.} \quad (3.5)$$

Ці формули не зовсім точно відображають характер залежності $\operatorname{tg} \delta$ реального конденсатора від частоти, тому при потребі використовують більш складні схеми заміщення конденсатора.

$\operatorname{tg} \delta$ вимірюється мостовими методами.

3.2 Завдання

3.2.1 Дослідити температурну залежність діелектричної проникності ε сегнетоелектрика.

3.2.2 Визначити температуру Кюрі, сталу Кюрі-Вейса і матеріал сегнетоелектрика.

3.3 Хід виконання роботи

Зняти температурну залежність ємності конденсатора з досліджуваним сегнетоелектриком і з неї визначити залежність діелектричної проникності ε від температури. Для цього двома довгими проводами з термостійкою ізоляцією приєднати досліджуваний конденсатор до мультиметра М 890. Для вимірювання температури використати термопару. Зразок вмістити в нагрівач. Підвищуючи (або знижуючи після попереднього нагрівання) температуру, зняти залежність ємності зразка від температури.

За результатами вимірювань побудувати графік залежності $\varepsilon = f(T)$. Спрямити спадаючу ділянку цієї залежності, тобто в області температур вище точки Кюрі, і визначити температуру Кюрі і сталу Кюрі-Вейса. Користуючись табличними даними, визначити матеріал сегнетоелектрика.

3.4 Контрольні запитання

1. Які матеріали називають сегнетоелектриками?
2. Чому сегнетоелектрики відносять до групи активних діелектриків?
3. Що таке явище поляризації?
4. Які механізми поляризації ви знаєте?
5. В чому полягає сутність спонтанної поляризації?
6. Які види поляризації, крім спонтанної, мають місце в сегнетоелектриках?
7. Які характерні властивості сегнетоелектриків ви знаєте?
8. Що таке точка Кюрі?
9. Намалуйте залежність діелектричної проникності сегнетоелектриків від напруженості електричного поля.
10. Який фізичний зміст має поняття відносної діелектричної проникності?
11. Як залежать поляризація й діелектрична проникність сегнетоелектриків від температури?
12. Як практично може бути використане досліджуване явище?

4 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4 ВИЗНАЧЕННЯ П'ЄЗОМОДУЛЯ ПОЛЯРИЗОВАНОЇ КЕРАМІКИ

Мета роботи: Вивчити прямий і зворотний п'єзоєфекти, а також резонансний метод визначення п'єзomodулів і експериментально визначити п'єзomodуль поляризованої кераміки.

4.1 Теоретичні відомості

Існує цілий ряд твердих кристалічних діелектриків, у яких при розтягуванні і стискуванні в певних напрямках виникає електрична поляризація. Саме виникнення електричних зарядів на поверхнях кристала при дії механічної напруги називається *прямим п'єзоелектричним ефектом*. Це явище було виявлено в 1880 р. П'єром і Жаком Кюрі. Такий ефект спостерігається у всіх сегнетоелектриків та в ряді інших (за кристалографічними ознаками) діелектриків (кристали кварцу, турмаліну, цинкової обманки, хлорату натрію, винної кислоти, тростинного цукру, сегнетової солі, титанату барію). П'єзоелектричні властивості можуть мати тільки іонні кристали. Якщо кристалічні ґратки позитивних і негативних іонів, з яких побудовані такі кристали, під дією зовнішніх сил деформуються по-різному, то в протилежних місцях на поверхні кристала виступають електричні заряди різних знаків.

В 1881 р. було теоретично передбачено, а потім і експериментально виявлено братами Кюрі наявність у тих же речовин зворотного явища – появи механічної деформації при дії на кристал електричного поля. Це явище носить назву *зворотного п'єзоєфекту*.

Природа п'єзоелектричного ефекту пов'язана із структурою кристала і його виникнення є наслідком появи чи зміни дипольних моментів. При однорідній деформації п'єзоелектричний ефект спостерігається за наявності в кристалі однієї або декількох полярних осей (напрямів). Під *полярною віссю* кристала розуміють будь-яку пряму, проведenu через кристал, обидва кінці якої нерівноцінні, тобто невзаємозамінні. Іншими словами, при повороті кристала на 180° навколо будь-якої осі, перпендикулярної до полярної, він не суміщається сам з собою.

Взагалі, для існування п'єзоелектричного ефекту при однорідній деформації потрібна відсутність у кристала центру симетрії. Дійсно,

якби недеформований кристал мав центр симетрії, то останній зберігся б і при однорідній деформації кристала. З іншого боку, в електрично поляризованому кристалі є особливий напрям, а саме напрям вектору поляризації. За наявності такого кристал не може мати центру симетрії. Таке протиріччя і доводить твердження про необхідність відсутності центру симетрії.

З 32 кристалічних класів не має центру симетрії 21 клас. У одного з них, проте, поєднання інших елементів симетрії робить п'єзоелектричний ефект також неможливим. Отже, п'єзоелектричні властивості спостерігаються у 20 кристалічних класів.

Розглянемо п'єзоелектричний ефект на прикладі кристала кварцу – найважливішого п'єзоелектричного кристала, що знайшов широке науково-технічне застосування завдяки своїм чудовим механічним і електричним властивостям. При звичайних температурах і тисках кварц зустрічається в так званій α -модифікації. Кристал α -кварцу (рис. 4.1, рис. 4.2, рис. 4.3, *а*) відноситься до тригональної системи і має три осі симетрії другого порядку, які направлені під кутом 120° одна до одної і є *полярними* (кожна з них з'єднує протилежні, але нерівнозначні ребра шестигранної призми) та позначені через: X – *електрична ось* (певний напрям у кристалі, вздовж якого виникає постійна поляризація), Y – *механічна ось*, Z – *оптична ось* (поворот кристала навколо цієї осі на будь-який кут ніяк не впливає на поширення світла в кристалі).

Появу п'єзоефекта можна пояснити, розглядаючи модель кристала кварцу. В деякому наближенні можна уявити, що іони кремнію та кисню в кристалічній ґратці кварцу розміщені так, як це зображено на рис. 4.3, *а*, де великими кружками позначені позитивні іони кремнію Si^{4+} , а маленькими – негативні іони кисню O^{2-} .

У початковому стані без додавання механічної напруги (рис. 4.3, *а*) центри ваги позитивних і негативних іонів співпадають, тому в цілому комірка електрично нейтральна і не має дипольного моменту. Якщо уздовж осі X прикладена зовнішня сила F_x , кристалічна ґратка деформується (рис. 4.3, *б*), відбувається перерозподіл зарядів і на поверхнях A і B кристала з'являються поляризаційні заряди. Це явище називається *поздовжнім* п'єзоефектом.

При прикладанні сили F_Y уздовж осі Y (рис. 4.3, в) на поверхнях A і B кристала з'являються поляризаційні заряди протилежних знаків. Це явище називається *поперечним* п'єзоефектом.

При прикладанні сили уздовж осі Z або гідростатичному стискуванні кристала поляризаційні заряди не утворюються.

Поляризаційний заряд пропорційний силі, прикладеній, наприклад, уздовж осі X :

$$Q = d \cdot F_X, \quad (4.1)$$

де d – коефіцієнт пропорційності, п'єзомодуль, $[Кл/Н]$.

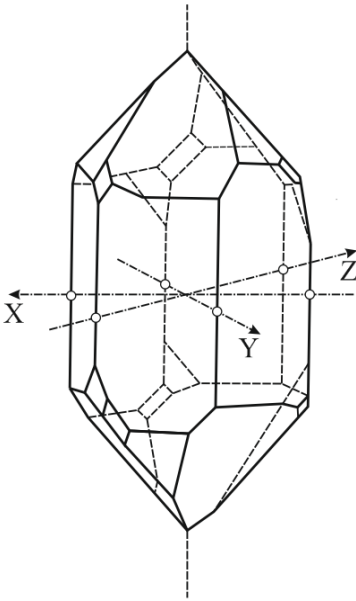


Рисунок 4.1 – Кристал кварцу SiO_2



Рисунок 4.2 – Зовнішній вигляд кварцових кристалів

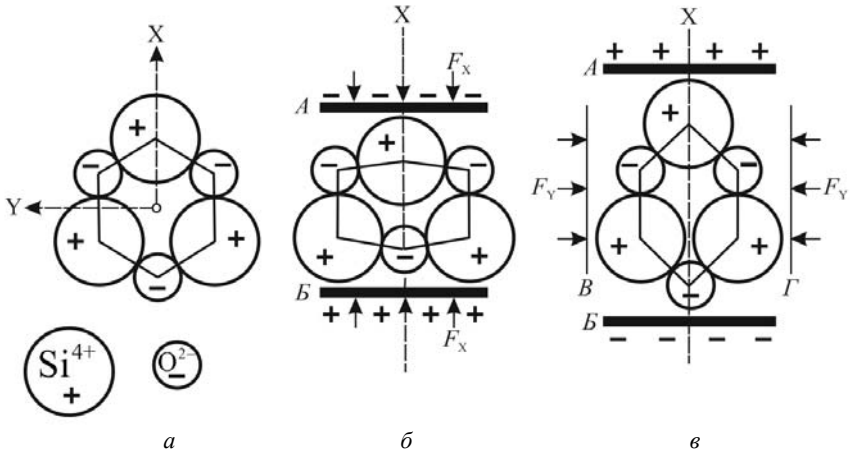


Рисунок 4.3 – Модель кристалічної ґратки кварцу

При прямому п'єзоефекті величина густини заряду, що виникає на поверхні кристала (і пропорційного їй вектора поляризації), лінійно залежить від величини механічної деформації (а в області пружних деформацій і від величини механічної напруги):

$$P = \frac{Q}{S} = d \cdot \sigma, \quad (4.2)$$

де P – вектор поляризації;

σ – механічна напруга;

d – п'єзомодуль – коефіцієнт пропорційності між виникаючою поляризацією і прикладеною механічною напругою.

При зворотному п'єзоефекті можна записати:

$$x = d \cdot E, \quad (4.3)$$

де x – п'єзодеформація;

E – напруженість електричного поля.

Величини п'єзомодулів одностипних прямого і зворотного п'єзоефектів, як витікає з термодинамічного розгляду, співпадають. Оскільки поляризація є вектор (3 компоненти), а механічна напруга є тензор другого рангу (9 компонент), то п'єзомодуль як коефіцієнт пропорційності між вектором і тензором другого рангу мусить бути

тензором третього рангу і складатися в самому загальному випадку з 18 незалежних компонент. Врахування симетрії кристалів призводить до того, що число незалежних компонент тензора п'єзомодуля зменшується. Так, у сегнетоелектриків типу титанату барію налічується 3 п'єзомодулі (d_{11} , d_{13} , d_{33}).

Найбільш сильно п'єзоєфекти виражені в сегнетоелектриках.

Виміряти п'єзомодуль можна, використовуючи як прямий, так і зворотний п'єзоєфект. При використанні прямого п'єзоєфекту до зразка прикладають одноосну механічну напругу і за допомогою балістичного гальванометра (чи електронного вольтметра) вимірюють п'єзозаряд. П'єзомодуль d визначається з формули для прямого позовжнього п'єзоєфекту.

Для вимірювання п'єзомодуля з використанням зворотного п'єзоєфекту найчастіше застосовують динамічний метод резонансу – антирезонансу. Цей метод використовується і в даній роботі.

Принципова схема для визначення модулів у динамічному режимі наведена на рис. 4.4.

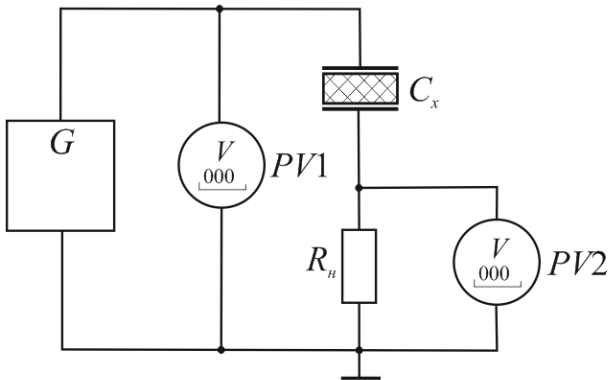


Рисунок 4.4 – Схема установки для визначення п'єзомодуля

До п'єзозразка прикладається змінна електрична напруга від генератора з регульованою частотою G , внаслідок чого у зразку збуджуються механічні коливання.

В електричному ланцюгу п'єзоелектричний зразок можна представити у вигляді еквівалентної схеми, представленої на рис. 4.5.

Коли частота зовнішньої напруги наближається до власної частоти коливань зразка, в ланцюгу мають місце резонансні явища. Оскільки в еквівалентній схемі є послідовна C і паралельна C_0 ємності, то можна спостерігати як послідовний, так і паралельний резонанс.

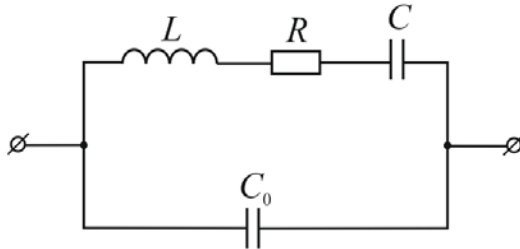


Рисунок 4.5 – Еквівалентна схема зразка

При послідовному резонансі сила струму в ланцюгу зростає і досягає максимального значення при частоті f_r (рис. 4.6). При подальшому збільшенні частоти струм падає і при частоті f_a (паралельний резонанс) досягає мінімального значення. Струм визначають за величиною падіння напруги на невеличкому опорі R_i , що включений послідовно зі зразком п'єзоелектрика. Точне значення частоти вимірюють за допомогою частотоміра.

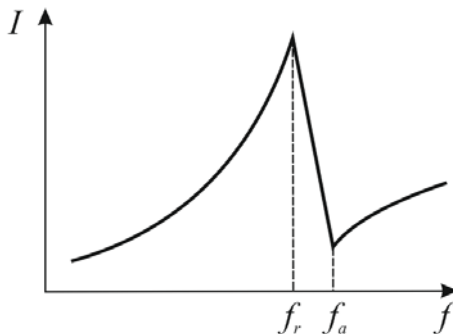


Рисунок 4.6 – Залежність сили струму в п'єзоелектрику від частоти

Якщо резонансні частоти п'єзозразка лежать за межами робочого діапазону частот вольтметрів, то замість останніх може бути використаний двопробеневий осцилограф.

Як зразок для вимірювання динамічного п'єзомодуля d_{31} в роботі використовують брусок чи диск сегнетоелектричної кераміки, попередньо поляризованої. Поляризація здійснюється витримуванням зразка під високою напругою (декілька кіловольт) на протязі 1 ÷ 2 годин. Формула для розрахунку п'єзомодуля в цьому випадку має вигляд:

$$d_{31} = 3,33 \cdot 10^{-5} \sqrt{\frac{\pi \cdot \Delta f \cdot \varepsilon}{64 \cdot \rho \cdot l^2 \cdot f_r^3}}, \left[\frac{\text{м}}{\text{В/м}} \right] \quad (4.4)$$

де l – довжина зразка;

ρ – питома вага кераміки, прийняти $\rho = 7\,000 \text{ кг/м}^3$;

f_r – частота резонансу;

Δf – різниця між частотами резонансу і антирезонансу;

ε – діелектрична проникність кераміки (визначається експериментально).

4.2 Завдання і хід виконання роботи

4.2.1 Зібрати схему для вимірювання (рис.4.4).

4.2.2 Включити генератор, частотомір, цифровий вольтметр (або осцилограф).

4.2.3 Встановити на виході генератора потрібну напругу (за вказівкою викладача) і підтримувати її незмінною при вимірюванні.

4.2.4 Змінюючи частоту генератора, зняти залежність напруги на опорі навантаження від частоти (особливо ретельно в області резонансу – антирезонансу). Частоту визначити за шкалою генератора або за допомогою зовнішнього частотоміра.

4.2.5 Побудувати графік залежності струму зразка від частоти.

4.2.6 За допомогою формули (4.4) визначити п'єзомодуль зразка досліджуваної кераміки.

4.3 Контрольні запитання

1. Що таке прямий і зворотний п'єзоефект? В яких речовинах має місце п'єзоефект?
2. Написати рівняння прямого і зворотного п'єзоефекту.
3. Що таке п'єзомодуль?
4. Яка ось називається полярною?
5. Який п'єзоефект називаються поздовжнім та поперечним?
6. Які існують методи вимірювання п'єзомодуля?
7. Як практично можуть бути використані прямий та зворотній п'єзоефекти?

ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. **Поплавко, Ю. М.** Фізика діелектриків: підручник / Ю. М. Поплавко ; за заг. ред. акад. НАН України Ю. І. Якименка. – К.: НТУУ «КПІ», 2015. – 572 с.
2. **Поплавко, Ю. М.** Физика активных диэлектриков: учебное пособие / под ред. проф. Сахненко В. П. / Ю. М. Поплавко, Л. П. Переверзева, И. П. Раевский. – Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2009. – 480 с.
3. **Поплавко, Ю. М.** Физика диэлектриков: учебное пособие для вузов [Текст] – К.: Вища школа, 1990. – 400 с.
4. **Пасынков, В. В.** Материалы электронной техники [Текст] / В. В. Пасынков, В. С. Сорокин. – СПб.: Издательство «Лань», 2001. – 368 с.
5. Электрорадиоматериалы [Текст] Под ред. Б.М.Тареева. – М.: Высшая школа, 1978. – 336 с.
6. **Вербицкая, Т. Н.** Вариконды [Текст] – М.–Л.: ГЭИ –1958. – 64 с.
7. **Смолянский, Г. А.** Физика сегнетоэлектрических явлений [Текст] / В. А. Боков, И. А. Исупов и др. – Л.: Наука, 1985. – 396 с.
8. Пьезоэлектрические материалы и преобразователи [Текст] Под ред. О.П.Крамарова. – Ростов-на-Дону: Изд-во Рост.ун-та, 1985. – 104 с.
9. **Морозов, А. И.** Пьезоэлектрические преобразователи для радиоэлектронных устройств [Текст] / В. В. Проклов, Б. А. Станковский – М.: Радио и связь, 1981. – 164 с.
10. **Малов, В. В.** Пьезорезонансные датчики [Текст] – М.: Энергия, 1978. – 248 с.